

TECNOLOGÍA PORTUARIA ROMANA

Publicado en la Revista Obra Pública Ingeniería y Territorio nº 56.
Monográfico Ingeniería e Historia II. CICCP. Septiembre de 2001

José Manuel de la Peña © 2001

jose.m.pena@cedex.es

TRAIANVS © 2002

Introducción

“La historia de Roma representa el último eslabón de la historia antigua de los países de la cuenca del Mediterráneo. Desde tiempos antiquísimos surgieron en las costas del mar Mediterráneo formaciones de clases y fueron echadas las bases de la civilización antigua...”¹, así comienza su libro el historiador ruso Kovaliov, y sintetiza lo que supuso para la ingeniería marítima la civilización romana: el compendio del saber y la sofisticación de la tecnología portuaria hasta límites no alcanzados hasta el siglo XVIII con el comienzo de la era industrial.

Cuando la arqueología y la reconstrucción paleogeográfica ponen a la luz estructuras portuarias de la grandiosidad del puerto Antiguo de Faros, descubierto por M. Gaston Joudet entre los años 1910 y 1915² y datado por Du-Plant y Taylor³ entre el 1900 y 1800 a. de C. o por M. Vigueras⁴, hacia el 2000 a. de C., aunque estas fechas hay que ponerlas como referencias en el tiempo, pues de la Peña ha determinado al menos cuatro fases de desarrollo en él.

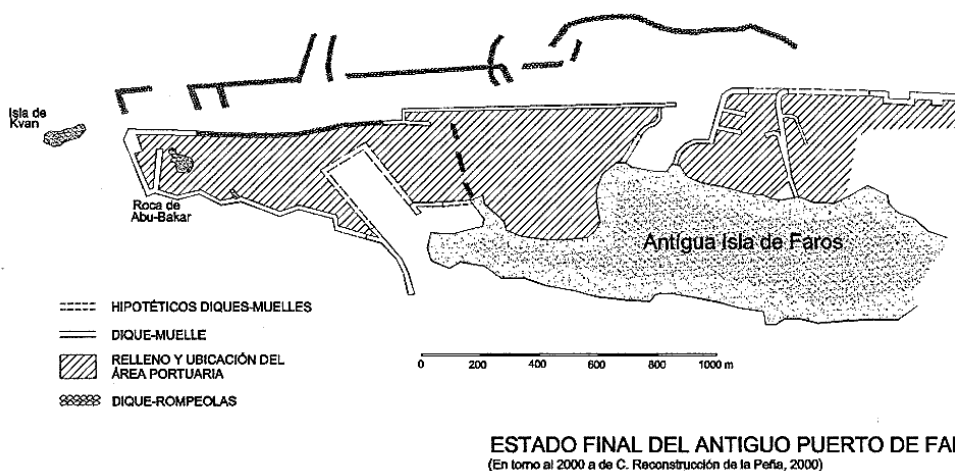


Figura 1: Puerto Antiguo de Faros, situado al oeste de la isla y actual puerto de Alejandría (de la Peña, 2000).

1 Kovaliov, Seguei Ivanovich. *Historia de Roma*, Madrid, Editorial Sarpe, 1985, p. 25.

2 Vigueras González, Modesto. *La tecnología portuaria del siglo de oro español*, Madrid, Dirección General de Puertos y Costas, 1979, pp. 22-24.

3 Du-Plant, F.M. y Taylor. *The design, construction and maintenance of docks, wharves and piers*, Londres, Eyre & Spottiswoode Publishers Ltd, 1949, pp. 1-24.

4 Vigueras González, Modesto. *La tecnología portuaria...* ob. cit.

Cabría preguntarse, si estas primeras civilizaciones mediterráneas, minoica y egipcia, fueron capaces de realizar tamaña empresa de ingeniería portuaria, con una superficie total de explanación mayor de 500.000 m² y una longitud de muelles en torno a 5 km. Qué no serían capaces de hacer los constructores e ingenieros portuarios romanos dos mil años después. Pero la técnica y los logros alcanzados en este campo por los romanos son muy difíciles, prácticamente imposibles de conocer, solamente puede intuirse por los pocos restos buscados, encontrados y estudiados, y por la escasa referencia escrita que ha llegado hasta hoy.

Pero, como han puesto de manifiesto algunos eruditos del tema, a veces resulta imposible interpretar restos arqueológicos, si no se tiene en suficiente conocimiento técnico del tema y ello suele tener un techo para los profesionales de la arqueología e historia. Además, el único escrito técnico de la antigüedad se halla en Vitruvio, que no pasa de ser un compendio general de la construcción, que ha pasado por diversas manos transcriptoras y traductoras y en el que se han perdido las figuras que al texto acompañaban.

En este artículo, pretendo aproximar al lector al conocimiento que se poseía en aquella época de esplendor histórico del imperio romano de la tecnología portuaria. Y espero que, tras su lectura, aprecie la grandiosidad que se alcanzó en el desarrollo técnico en aquella época y deseche mitos que hasta hoy hemos oído hablar minimizando el conocimiento portuario y marítimo que tenían entonces, y del que con el estudio intentamos ir desvelando mi compañero y colaborador Juan Manuel Prada Espada y yo, ayudados por Carlos Redondo.

Concepto de puerto y organización portuaria

Para conocer qué concepto tenían los antiguos sobre puerto, debe leerse con cuidado algunos textos clásicos. El único texto técnico antiguo que se ha conservado pertenece a Vitruvio; es el famoso el tratado titulado «Los diez libros de arquitectura». El capítulo 13º del libro V, titulado «De los puertos y de las obras de albañilería bajo el agua», es el que contiene muy condensado, parte del conocimiento y de las formas de hacer de los ingenieros civiles romanos que se dedicaron a las obras marítimas en aquellos tiempos. Este capítulo comienza definiendo las características primordiales que debe poseer todo puerto:

"No debo pasar en silencio las ventajas de los puertos y de qué manera es posible hacerlos capaces para que sirvan de abrigo a las naves durante las tempestades.

Estos puertos, cuando la Naturaleza o el lugar les presta condiciones favorables y tienen escollera, cabos o promontorios prolongados, y cómo consecuencia forman naturalmente en su interior arcos o recodos, ofrecerán sin duda las mayores ventajas. Bastará entonces construir en torno suyo pórticos, atarazanas, almacenes y estradas para las mercancías, y desde allí calles hasta los mercados...."

Así, por tanto, los romanos sabían diferenciar entre fondeadero; lugar más o menos abrigado de la costa donde lanzar el ancla para comerciar durante pocos meses al año o para protegerse de los temporales, y puerto natural o artificial; espacio de aguas tranquilas para el amarre de los barcos, con la función añadida del intercambio comercial entre el mar y la tierra.

El desconocimiento de que, en esa y en anteriores épocas, se tenían muy claros estos conceptos, ha originado ciertas confusiones al estudiar y traducir escritos clásicos y al interpretar algunos restos arqueológicos. Un ejemplo de ello, es la polémica suscitada en torno a la existencia del puerto romano de Tarragona, de la que algunos autores no dudan, a pesar de que Estrabón (III,4,7) afirma textualmente que "...La primera ciudad es Tarrakon, que, aunque no tiene puerto, esta levantada

sobre un golfo...”⁵. Cuando Estrabón escribe que la ciudad no tiene puerto, no niega la posible existencia de un malecón como abrigo de un fondeadero más o menos grande, lo que dice de forma implícita es que, a pesar de que existía un golfo, el lugar no reunía las condiciones necesarias para ser considerado como puerto, tal y como Vitruvio y los antiguos entendían ese concepto; así, Polibio (X,1) escribe: “...cualquiera que venga de Grecia ... ha de fondear en el puerto de Tarento y celebrar aquí los cambios y negociaciones que tenga con todas las ciudades de la costa. Se puede inferir la situación de esta bella ciudad por la fortuna que hicieron en otro tiempo los crotonianos, los cuales no teniendo más que unos fondeaderos de verano a donde abordaban poquísimas embarcaciones consiguieron sin embargo inmensas riquezas, no por otra causa, en el concepto común, sino por la oportunidad del lugar...”. Si esto es así, los que hoy sostienen que en la ciudad de Tarragona hubo un puerto romano, no tienen el mismo concepto de puerto que los ingenieros civiles romanos siendo, el de estos últimos, análogo al que mantiene la Ingeniería Portuaria actual. Si bien pudiera haberse construido un puerto con posterioridad a que Estrabón escribiera su «Geografía», en el siglo I a. de C., como así lo apunta Fernando Ramblau, que ha querido ver algunos restos de pilares en cartografías antiguas de Tarragona: restos de un dique-muelle de arcadas; pero tal afirmación no se encuentra lo suficientemente bien documentada ni contrastada.

La dominación romana de las costas supuso la dominación de sus puertos y de las rutas comerciales que confluían en ellos; pero la actividad y tráfico naval se complementó con un desarrollo importantísimo de las rutas terrestres; creando Roma una red viaria que ha llegado a utilizarse hasta el siglo XVIII. Esta red tan tupida de vías terrestres transformó todas las zonas de influencia de los puertos: anteriormente existían una multitud de puertos importantes, y con el desarrollo viario romano aumentaron espectacularmente la zona de influencia de los puertos, quedando en uso solamente un reducido número de grandes puertos -Ostia, Puteoli, Gadir, Alejandría,...- y una serie de puertos pequeños de escala, locales y cabotaje. Normalmente, estos grandes puertos no eran exclusivamente un puerto, sino una agrupación de instalaciones portuarias; como así sucedió con el puerto de Gadir el cual englobaba tanto en propio puerto de Gadir [Cádiz] como Portus Gaditanus, los astilleros situados en el actual Puerto Real,...; o Puteoli que englobaba a diversos puertos alrededor del golfo de Nápoles como el propio puerto de Puteoli, Miseno, Nápoles,...

Conocimiento técnico para el proyecto de obras portuarias

Buscando hasta la más pequeña referencia técnica en autores clásicos como Vitruvio, Estrabón, Mela, Herodoto, Polibio, Quinto C. Rufo, Flavio Josefo, etc. y estudiando la documentación arqueológica disponible, se puede afirmar que los ingenieros romanos dedicados a las obras civiles dominaban la construcción de cualquier tipo de estructura y los conocimientos técnicos relacionados con ella.

Es de destacar que los que se dedicaban a las obras marítimas y portuarias conocían ampliamente su oficio. Distinguían claramente entre un simple fondeadero y un puerto, natural o artificial, exigiendo al puerto una serie de servicios básicos tal y como hoy en día se hace (Polibio X-1, Vitruvio V-13). Sabían, de acuerdo con el hacer de su tiempo, que la condición mínima que debía tener una zona de costa para construir en ella un puerto artificial era la existencia de una playa apropiada insuficientemente protegida del oleaje (Vitruvio V-13).

Estos ingenieros entendían que la disposición en planta de un puerto se configuraba con una playa en la que a un lado de ella, o generalizando el concepto, a ambos, se disponían el o los diques exteriores que proporcionasen el suficiente espacio de aguas abrigadas a los barcos. Sabían también que tipo de

⁵ García Bellido, Antonio. España y los españoles hace dos mil años (según la Geografía de Strábon), Madrid, Espasa Calpe (Colección Austral, A 203), 1993.

obras auxiliares; almacenes (*horreas*), pórticos, atarazanas, y estradas, debía tener todo puerto, natural o artificial (Vitruvio V-13).

Los ingenieros portuarios conocían la necesidad de realizar estudios técnicos para determinar racionalmente el lugar de la costa más adecuado para ubicar el puerto, y decidir, entre los diferentes tipos de estructuras marítimas, la que se debía construir. Estos trabajos previos consistían en estudios sobre el clima marino de la zona a fin de determinar la disposición en planta del puerto y la de sus obras exteriores, posibilitando así, entre otros condicionantes, el máximo aprovechamiento de los vientos en su bocana (Flavio Josefo I-16) y el tipo de estructura de defensa que se emplearía en la construcción del dique (Vitruvio V-13).

También hacían estudios geotécnicos sobre la naturaleza de los fondos, bien mediante sondas (Herodoto II-5) o utilizando *urinadores*⁶ para que tomasen muestras del lecho marino. Con ellas podían conocer su calidad y capacidad portante y en función de ellas, además de fijar el emplazamiento de la obra, elegir el tipo de cimentación. Estos trabajos permitían saber, si la calidad de los fondos era mala, el tipo de saneamiento a realizar en el lecho marino para encontrar el firme y determinar así la cantidad de material a dragar hasta alcanzarlo, e incluso, en función del tipo de cimentación, que longitud de tablestaca se tendría que hincar en el fondo para conseguir un recinto estable (Vitruvio III-4 y V-13).

Los ingenieros romanos conocían la importancia de una buena comunicación terrestre entre el puerto, la ciudad y su zona de influencia (Vitruvio V-13). Habitualmente los puertos estaban en las proximidades de las ciudades, pero en aquellos casos en los que estaban aislados de los centros urbanos, a su alrededor se construía una muralla con el doble objetivo de servir de control comercial-aduanero y de defensa frente a agresiones externas (Flavio Josefo I-16).

Estos técnicos dominaron diferentes formas constructivas para un mismo tipo de estructura en función del material disponible en obra, de las solicitaciones del oleaje y de la capacidad portante de los fondos (Vitruvio V-13). También fueron capaces de definir el mejor proyecto para la construcción de una determinada estructura, en el que fijaban sus fases en función de la forma constructiva elegida para la realización del dique.

La ingeniería civil romana y sobre todo la rama que se dedicó a las obras en el mar, experimentó un gran avance respecto de los logros alcanzados en este campo por otras culturas del Mediterráneo cuando descubrió la forma de fabricar morteros y hormigones hidráulicos utilizando tierra de las regiones de Cumas y de Bayas⁷ compuestas por polvo puzolánico y conocida en su tiempo por *carbúnculo*.

Las obras que debía poseer un puerto para considerarlo como tal eran las mismas que hoy en día se consideran y que pueden clasificarse en:

- Obras exteriores u obras de defensa
- Obras interiores
- Obras auxiliares

Y estos tres grupos de obras portuarias son los que se irán comentando en los apartados siguientes.

⁶ Constituyeron un gremio y eran los buceadores que en los puertos se dedicaban a rescatar las mercancías que caían al agua durante los trabajos de carga y descarga.

⁷ En el tratado de Vitruvio, en su libro 2 dedicado a los materiales de construcción, en el capítulo VI titulado "Del polvo de Puzol", se puede leer: "Hay también una clase de polvo que por su propia naturaleza produce efectos maravillosos. Se halla en la región de Bayas y en los territorios que están en las cercanías del Vesubio. Este polvo, mezclado con cal y la piedra machacada, no solo consolida toda clase de edificaciones, sino que incluso las obras que se hacen bajo el agua del mar tienen solidez."

Obras exteriores

Las características más importantes y tipos de obras exteriores o de defensa portuarias pueden estudiarse en base a los escritos del Arquitecto Romano. Comienza Vitruvio la exposición del capítulo (V, 13) diciendo: “No debo pasar en silencio las ventajas de los puertos y de qué manera es posible hacerlos capaces para que sirvan de abrigo a las naves durante las tempestades...”.

“...Estos puertos, cuando la Naturaleza o el lugar les presta condiciones favorables y tienen escollera, cabos o promontorios prolongados, y cómo consecuencia forman naturalmente en su interior arcos o recodos, ofrecerán sin duda las mayores ventajas...”. Enumera en estas líneas las características morfológicas que debía reunir una zona del litoral para ser utilizada como puerto natural y las formaciones costeras que debía tener: acantilados, restingas, bajos, cabos, promontorios, islas; cuya función era encalmar las aguas de sus playas, bahías, radas o rías; a fin de ser utilizadas por los barcos como lugares de amarre e intercambio de mercancías, zonas de varada y reparación de averías, sitios de avituallamiento y aguada, etc. “...Pero si no hubiera un lugar naturalmente apropiado para proteger los navíos durante las borrascas, parece que debe procederse de este modo: si hubiese en aquel lugar un pico que constituyera un abrigo contra las tempestades, sino que sólo por una parte hubiera una playa apropiada, entonces es preciso levantar del otro lado, con ayuda de mampostería, espolones o escolleras que lleguen a formar un puerto cerrado...”. Tras leer estos párrafos, queda claro que Vitruvio era consciente de la diferencia entre puerto artificial, protegido por obras de abrigo, y puerto natural, que no las necesita, lo que indica que ambos tipos de puerto eran de uso común en su época.

Estas frases explican que para construir un puerto artificial en una determinada zona de la costa, debe haber en ella una playa parcialmente abrigada por un cabo o cualquier otro accidente costero. Quizás, el concepto de “...playa apropiada...”, se puede traducir mejor, en un sentido más amplio, como concavidad litoral, y, debemos apuntar también, que para construir un puerto, los ingenieros de la época no consideraban absolutamente necesario la existencia de un playazo. Se afirma también que, para disponer de un “...puerto cerrado...” en una zona litoral habría que construir, según Vitruvio, a un lado de la playa, o generalizando el concepto, en bahías abiertas, a ambos, el, o los diques exteriores que cerrasen el paso a las olas, creando así el área de aguas protegidas de la dársena del puerto. El Arquitecto hace mención a la “...mampostería...”, los “...espolones...” y a las “...escolleras...” cuando habla de construir un “...puerto cerrado...”, para describir con tres palabras, los materiales que se empleaban en las estructuras portuarias de atraque y de defensa de uso corriente en su época, y también, para que la gente de formación técnica que las leyese entendiera, desde su experiencia, cual era el tipo de dique se podía construir empleando cada uno esos elementos:

1. “...mampostería...”. Con este material se hacían estructuras verticales empleando diferentes métodos constructivos.
2. “...espolones...”. Se debe traducir aquí "espolón", por el término actual "pilote". Estas estructuras, formadas por entramados de pilotes clavados mediante maquinaria de hinca, constituían la infraestructura de todo tipo de obras portuarias.
3. “...escolleras...”. Realizando vertidos de piedras de diferentes tamaños se construían estructuras de escollera en talud similares a los actuales.

Estos tres tipos de estructuras portuarias, un dique vertical de “...mampostería...”, otro de “...escolleras...” en talud y un tercero de arcadas aparecen representados en el mosaico romano del siglo III d. de C., hallado en la Vega Baja de Toledo y que se encuentra en los depósitos del Museo de Santa Cruz de Toledo,



Figura 2: Mosaico del siglo III d. de C., encontrado en la Vega Baja de Toledo (Foto CEHOPU)

A lo largo de la historia se han construido diques cuya tipología está reflejada en esta misma clasificación. Del año 2000 a. de C., datan los diques verticales y en talud que defendían el puerto Antiguo de Faros⁸,

⁸ Estaba situado en la margen occidental de la antigua isla del mismo nombre, en la actual Alejandría. Este puerto fue construido en distintas fases, una primera entre el 2000 y el 1800 a.C. durante el reinado de la XII dinastía, en pleno Imperio Medio, para cubrir las necesidades del comercio entre el pueblo cretense y el egipcio. Su máximo desarrollo lo alcanzó entre el 1550 y el 1400 a.C. cuando Egipto, bajo la XVIII dinastía, fue la nación más poderosa del Mediterráneo oriental, llegando a sus instalaciones las mercancías del Egeo, vía Creta, y las de Anatolia, Hatti, Mitanni y las costas sirio-palestinas, vía Biblos.

Las estructuras verticales fueron empleadas posteriormente por los fenicios, los griegos y, como dice Vitruvio, por los romanos. Una muestra de dique vertical fenicio se encuentra en el puerto de Akko⁹ y, como ejemplos de este tipo de obra de defensa romana, están las ruinas del puerto de Emporion y los restos sumergidos del dique vertical del puerto romano de Murgi¹⁰.



Figura 3: Dique vertical romano de Emporión, construido en dos fases.

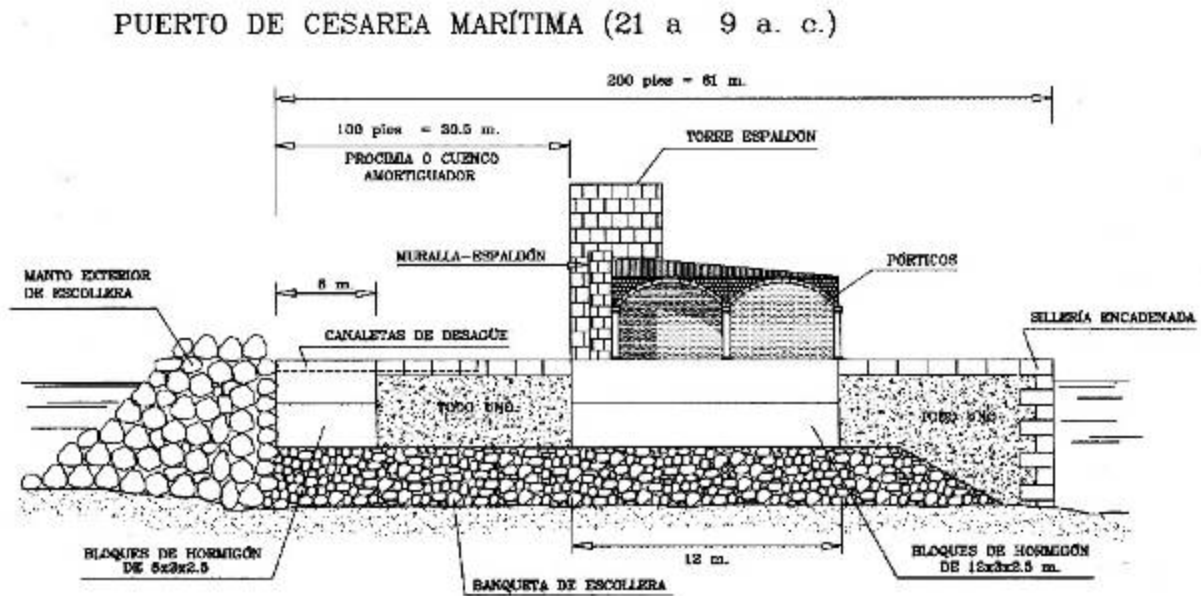
En los diques verticales romanos la superestructura formada por bloques alcanzaba una profundidad máxima de 4 ó 5 m, colocándose en pequeñas profundidades, sobre una cama de escollera o directamente sobre el fondo. Para mayores calados se construía un dique de escollera en talud sumergido a modo de infraestructura, en el que su cota de coronación, que servía de cimiento a los bloques de la estructura vertical, se mantenía a esa misma profundidad de 4 ó 5 m. Tanto para medianos como para grandes calados, terminada la superestructura, era frecuente adosar un escollerado en lado hacia el mar para que el dique disipase el oleaje de forma casi similar a como lo hace una estructura de defensa de escollera en talud.

El ejemplo más significativo y estudiado de este tipo de dique se encuentra en el puerto de Cesárea Marítima,

9 Inman, Douglas L. Ancient ant modern Harbors: a repeating phylogeny. Proceedings of the 14th I.C.C.E., 1974, Vol. III, pp. 2049-2067.

10 Situado en la Laja del Palo (Roquetas de Mar, Almería).

Peña Olivas, José Manuel de la y Juan M. Prada Espada. Murgi: un antiguo puerto romano en Almería. Revista de Arqueología, 1995, n° 168, pp. 36-43.



(Reconstrucción: J. M. de la Peña, J. M. Prada, C. Redondo)

Figura 4: Sección tipo del puerto de Cesarea Marítima (de la Peña, Prada & Redondo)

En sus estructuras portuarias, está condensado gran parte del saber hacer de los ingenieros civiles portuarios de Roma. En la construcción del dique y el contradique, se integraron las técnicas del vertido de escollera de las infraestructuras, con la de cajones flotantes utilizados como encofrado perdido de las losas de cimentación o destinados a la colocación de los bloques de las superestructuras, y, se dispuso, como cuenco amortiguador del oleaje, el espacio de 30,5 m comprendido entre el escollerado adosado de defensa y las murallas que, construidas en mitad del dique, funcionaban como su espaldón.

Vitruvio describe diferentes métodos constructivos de los diques verticales que se empleaban en su tiempo y cómo, de forma indirecta, indica algo sobre la construcción de las estructuras en talud. Sin embargo, nada cuenta de las estructuras sobre "...espolones...", que rara vez se emplearon como obras aligeradas de defensa, aunque sí como pantalanés y como cimentación en el mar de muelles, estatuas, torres de defensa y de señalización. En el famoso sextercio de Nerón se aprecia que la plataforma que sostenía la estatua de Claudio en la entrada del puerto de Ostia estaba pilotada.

Después de morir Vitruvio, se construyeron diques aligerados de arcadas sobre pilas. El ejemplo más célebre y clásico de este tipo de estructuras, está representado en la famosa pintura mural encontrada en Stabia, cerca de Pompeya, que reproduce el puerto de Puteoli,



Figura 5: Pintura mural romana que representa el puerto de Puteoli (actual Puzoli).

Este puerto estaba defendido por un dique¹¹ de 372 m de largo, sustentado por 15 pilas de bloques de piedra volcánica de planta rectangular de 16 m², colocados sobre cimentaciones de hormigón puzolánico. Los arcos de unión entre ellas estaban construidos con ladrillos y bloques de arenisca unidos con mortero puzolánico. En el fresco aparecen otras estructuras portuarias, como el pantalán situado al fondo del puerto sobre peines de tres pilotes y un faro o baliza sobre la estructura de defensa. Los restos del dique aún se podían ver en el siglo XVIII¹².

De todas las formas constructivas básicas de diques empleadas por los ingenieros romanos cuya utilización estaba en función de la capacidad portante del terreno, del clima marino y del tipo de

11 Blackmann, D.J. *Ancient Harbours in the Mediterranean. Part1*, The International Journal of Nautical Archaeology and Underwater Exploration, 1982, vol. 11.2, pp.79-104.

Blackmann, D.J. *Ancient Harbours in the Mediterranean. Part2*, The International Journal of Nautical Archaeology and Underwater Exploration, 1982, vol. 11.3, pp.185-211.

12 Hamilton, William. *Les fureurs du Vésuve*, Evreux, Kapp Lahure Jombart, 1992.

materiales disponibles para realizar la obra, se pueden enumerar las que se conocen a través de Vitruvio (V-13)¹³:

a) Dique vertical de hormigón en masa

Las condiciones que Vitruvio enumera para decidir la construcción de este tipo de estructura marítima eran las siguientes: existencia de una playa apropiada, calidad de los fondos aceptable, posibilidad de utilizar en obra el cemento puzolánico y solitaciones del oleaje de pequeña entidad. Se comenzaba construyendo un recinto tablestacado mediante la hincada de tablestacas de madera de roble. Posteriormente, se reforzaban las esquinas con piezas en forma de L, de hierro o bronce, para evitar dañarlas al rigidizar el conjunto mediante unas cadenas que se colocaban alrededor de su perímetro y se traccionaban por tensores.

Rigidizado el recinto de tablestacas, cuando la capacidad portante del fondo era óptima, se procedía a sanear sus capas superficiales dragando al mismo tiempo que se realizaba el perfilado de la cimentación, o bien, mediante esta misma técnica, cuando la calidad de la primera capa del lecho marino no era del todo aceptable, se alcanzaba el firme próximo dejando un vaciado de cimentación más profundo. El dragado del fondo se realizaba con dragas manuales iguales a las que se han utilizado, sin grandes variaciones técnicas, hasta principios del siglo pasado. Posteriormente, se procedía a hormigonar bajo el agua, llenando el recinto con el conglomerado hidráulico. Transcurrido el tiempo de fraguado, se desencofraba retirando las tablestacas y se procedía a un nuevo avance de la obra, repitiendo todos los pasos descritos.

Finalizada en toda su extensión la estructura, se solía coronar el dique con un cabecero realizado mediante muros perimetrales de ladrillo o sillería en los que se colocaban los dispositivos de amarre; doctyliums y argollas. El hueco dejado entre ellos se rellenaba de "todo uno" y sobre este material disgregado, compactándolo, se construía una calzada. Otras veces este remate se hacía con un enlosado colocado sobre el material de relleno. Su anchura, solía ser como mínimo de unos 6 m. Ejemplo de este tipo de diques se encuentran en los conservados el Emporión y especialmente el de Murgi. Con un estudio pormenorizado de este puerto de Murgi podría saberse la longitud de los tramos de avance de construcción y la capacidad de vertido por lechada.

b) Dique vertical de bloques de hormigón:

Las condiciones que Vitruvio enumera para decidir la construcción de este tipo de estructura marítima eran las siguientes:: existencia de una playa apropiada, calidad de los fondos aceptable, pequeños y medianos calados, posibilidad de utilizar en obra el polvo de Puzol, solitaciones de fuerte oleaje o cuando la obra se iba a asentar en mar abierto.

Se arrancaba desde tierra vertiendo un primer tramo de banqueta de escollera de regularización, siguiendo el talud natural del terreno si este no era muy escarpado, o con un nuevo talud más suave si el natural tenía mucha pendiente. La banqueta se prolongaba hasta alcanzar una profundidad máxima en su coronación de 2,5 m, dependiendo esa cota del tamaño del bloque que se colocaría encima de ella,

13 Peña Olivas, José Manuel de la, Juan M. Prada Espada y Carlos Redondo Morejón. Ingeniería romana a comienzos de nuestra era. Revista de Obras Públicas, 1996, nº 3351, pp. 55-73.

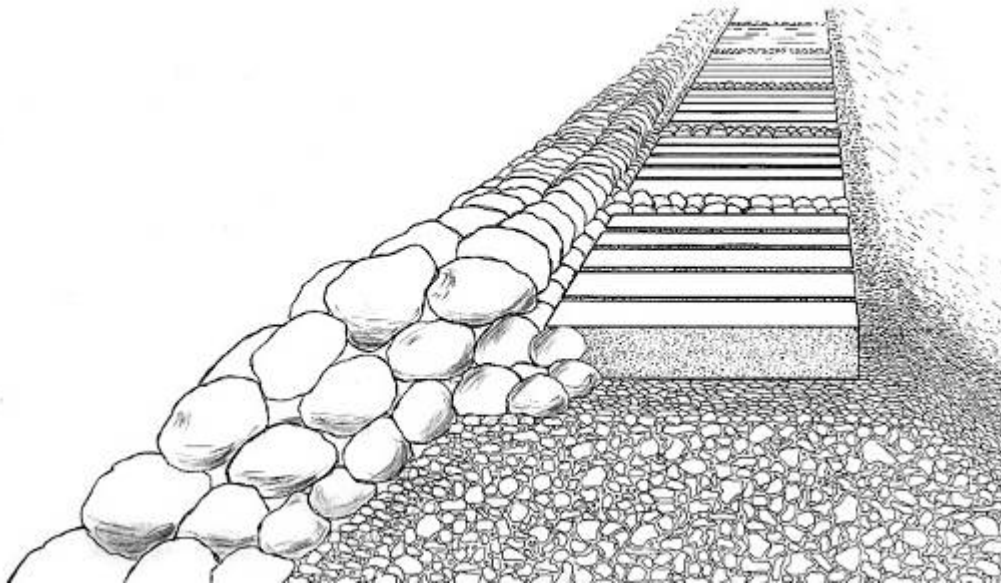


Figura 6: Dique romano de bloques de hormigón (de la Peña, Prada & Redondo).

Se continuaba con el vertido de escollera, siempre a esa cota, hasta que el calado permitía realizar un escalón, ganando así profundidad para colocar dos bloques sobre ella.

Una vez construida la banqueta de asiento, en su perímetro se hincaba un recinto de tablestacas contrapeadas de píce y medio de espesor (46 cm), y con una longitud de acuerdo al número de bloques que se fueran a hormigonar "in situ". Las cabezas de las tablestacas alcanzarían un nivel superior al del mar. El interior del recinto se rellenaba de arena limpia, de playa o de río, y se enrasaba al nivel de las cabezas de las tablestacas. Sobre esta plataforma de arena se construían los encofrados de madera para el hormigonado de los bloques, normalmente cinco por hilada.

El tamaño de los bloques podía alcanzar un máximo de 15 m de longitud y 3 m de alto y de ancho. Es lógico suponer que la máxima longitud de estos bloques vendría dada por la experiencia que los ingenieros romanos tendrían sobre las consecuencias de sobredimensionarlos, pues sabrían que en función de dilatación del hormigón que empleaban, de la esbeltez de la pieza y del propio peso, aparecerían fracturas de tal importancia que darían en ruina la obra.

Fraguados los bloques y desmontado el encofrado, se abrían a ambos lados del recinto de tablestacas unas zapas, previamente construidas, por las que la arena fluía hacia el lecho marino bajo la presión del peso de los bloques y por la socavación producida por el agua del mar, permitiendo que los bloques se asentasen lentamente en su emplazamiento sobre la banqueta de escollera.

En la zona que llevaba dos bloques, profundidades de hasta 5 m, una vez situado el primero de ellos sobre la escollera, se reparaban las zapas del recinto y se volvían a repetir el método.

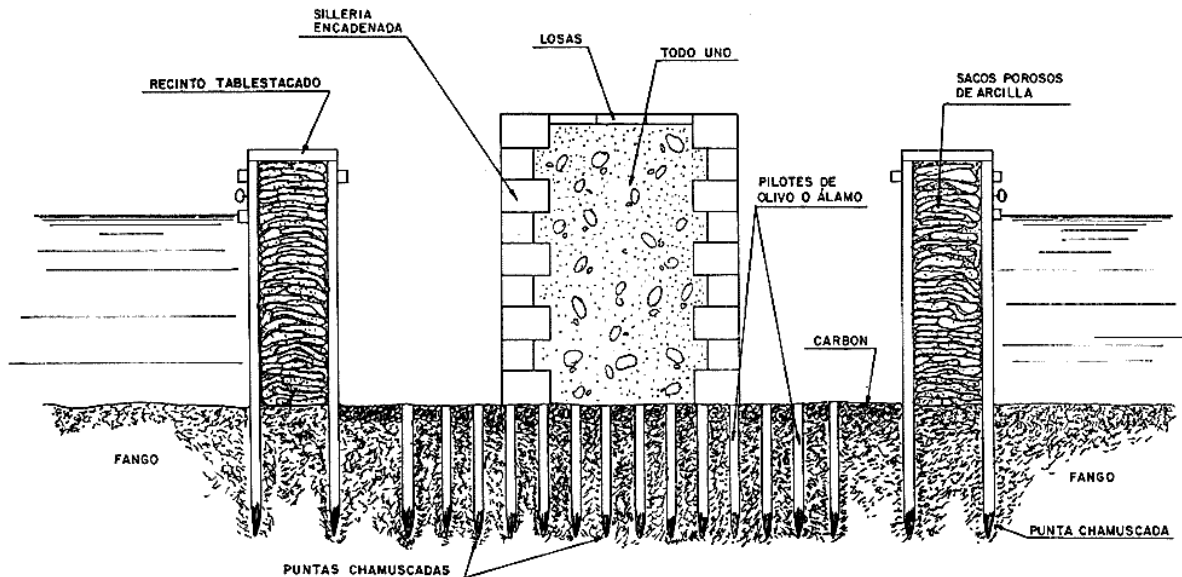
A medida que el calado aumentaba la banqueta se transformaba en un verdadero dique sumergido de escollera en talud ya que con esta estructura se podían alcanzar grandes profundidades. Cuando la obra alcanzaba calados grandes, se abandonaba la forma constructiva anterior y se continuaba la estructura utilizando otro método. Consistía este en aumentar la profundidad de la cota de coronación de la banqueta de regularización hasta los 6 o 7 metros de profundidad.

Para hormigonar los bloques que constituían la estructura vertical, se fondeaban cajones de madera sobre el dique sumergido, utilizándolos como encofrado perdido. El ejemplo más importante de esta forma constructiva para grandes calados se encuentra en el puerto de Cesárea Marítima,

c) Dique vertical de paredes de sillería:

Las condiciones que Vitruvio enumera para decidir la construcción de este tipo de estructura marítima eran las siguientes:: existencia de una playa apropiada, calidad de los fondos de buena a mala, pequeñas a medianas profundidades, sin posibilidad de utilizar cemento puzolanico en obra, solicitudes de fuerte oleaje o cuando la obra se iba a asentar en mar abierto.

La obra partía de tierra creando ataguías de entibaciones dobles, similares a las empleadas por los ingenieros romanos en la cimentación de grandes puentes.



(reconstrucción de la Peña, Prada & Redondo'95, según descripción de Vitruvio (5,13))

Figura 7: Dique vertical romano de sillería con cimentación micropilotada (de la Peña, Prada & Redondo).

Las ataguías, estaban constituidas por dos entibaciones de cuarterones verticales de roble hincados en el lecho marino. En la parte superior de la cara que quedaba expuesta al mar se disponían dos cuarterones horizontales en doble vía para que entre ellos se alojasen las cadenas que rigidizaban el conjunto. Para que el recinto una vez desecado aguantara la presión hidrostática, en la parte superior de la cara que quedaba en seco se colocaba una sola vía de cuarterones horizontales para arriostrarla con contrafuertes. Ambas entibaciones, la exterior y la interior, se unían superiormente clavando cada cierta distancia cuarterones transversales para soportar los esfuerzos horizontales. Entre las dos entibaciones se colocaban sacos de enea llenos de arcilla que una vez compactados dejaban el recinto aislado e impermeabilizado.

Construido el recinto se procedía al achique del agua del interior mediante tornillos de Arquímedes o cocleas, tambores o ruedas de cangilones, aunque estas máquinas daban un menor rendimiento de achique, o bien bombas de pistón o de Ctesibio. Desecado el recinto se aseguraban los contrafuertes en la entibación interior y comenzaban los trabajos de cimentación.

Para buenas capacidades portantes del terreno estos trabajos consistían en la excavación de dos zanjas corridas de una anchura superior al muro que iban a soportar, normalmente el doble de su grosor, tal y como. A continuación se rellenaba las zanjas con mampostería de piedra ligada con mortero de cal y arena, hasta enrasar con el terreno natural.

Cuando no resultaba factible realizar un saneamiento de los fondos debido a la presencia de estratos constituidos por terrenos poco cohesivos, se creaba un campo de micropilotes de maderas resistentes al agua y a las corrosiones, utilizando la técnica del chamuscado de las puntas para facilitar su penetración en el lecho marino. Concluida esta fase se procedía a retacar con carbón los huecos existentes entre las cabezas de los micropilotes, extendiéndose este relleno a los límites de la ataguía para evitar en lo posible la erosión en el pie del dique-muelle que pudiera producirse al poner la obra en servicio.

Finalizado el cimientado por cualquiera de los métodos descritos, se construían sobre los muros perimetrales de la estructura utilizando sillería encadenada. Los sillares tenían la mayor longitud posible para reducir al máximo el número de juntas y dar así una buena estabilidad a los muros que formaban la parte exterior de la estructura, colocándose en su parte superior los dispositivos de amarre; doctyliums y argollas. El espacio vacío existente dentro de la misma se rellenaba con "todo uno" apisonado y la obra se remataba en su parte superior haciendo un camino de rodadura, utilizando losas, embutiendo piedras, etc.

Estos tres tipos de estructura de defensa portuaria eran elementos básicos que podían combinarse convenientemente para construir diques mucho más robustos. Tal es ejemplo ya descrito y que se presenta en la figura 4: Se trata de la sección tipo del dique de defensa del puerto de *Cesarea Marítima*, mandado construir por Herodes el Grande. Su descripción nos ha llegado por Flavio Josefo (I-16) y sus restos se han estudiado minuciosamente, especialmente por Raban. La estructura base del dique está formada por dos diques de bloques de hormigón, antes descritos, de 6 y 12 m de ancho aproximadamente y por un dique vertical de sillería. Tras construir estos tres diques paralelos, el espacio intermedio se rellenó de todo uno, utilizando la misma técnica que 2000 años antes habían utilizado los ingenieros portuarios minoicos en la construcción del puerto Antiguo de Faros. El resultado fue un dique de 61 m de anchura al que se le adosó un manto exterior de escollera. La mitad de su ancho, 30'5 m, se la dejó libre para que funcionase como cuenco amortiguador del oleaje, llamado por los romanos *provincia*. En ese cuenco se dispuso de una serie de canaletas hechas en el hormigón que funcionaban como red de drenaje del agua de rebase de la ola. En la mitad del dique se dispuso de un muro o espaldón que aislaba el cuenco amortiguador de la zona de muelles. Este espaldón se reforzó construyendo cada cierta distancia torres de sujeción del muro.

Obras interiores y auxiliares

Las obras interiores y auxiliares que disponían los puertos en la antigüedad y en especial en el periodo romano se pueden enumerar tal y como las describe Vitruvio (V, 13): "...Bastará entonces construir en torno suyo pórticos, atarazanas, almacenes y estradas para las mercancías, y desde allí calles hasta los mercados....", a ellas hay que añadir los sistemas de aguada, señalización y maquinaria, los distintos sistemas de amarre y, finalmente los edificios auxiliares portuarios. La descripción de todos estos grupos de obras interiores, y obras, maquinaria y edificios auxiliares se hace a continuación, que por el espacio y fin de este propio artículo, se hace de forma resumida

Los pórticos formaban el recinto dónde se establecían las "*horreas*" (tinglados, almacenes), las oficinas y otras dependencias portuarias. Frecuentemente se construían alrededor de las zonas de carga y descarga de mercancías. Cuando el trasdós del dique se utilizaba como muelle, los pórticos se empleaban también como contrafuerte o refuerzo del muro perimetral que servía de espaldón, tal y como sucedía en el puerto de Cesarea Marítima.

Las atarazanas, o arsenales, se construían en la zona más al interior del puerto, frente a las estradas o varaderos, y su estilo no distaba mucho de las construidas por los griegos, si bien se adaptaban a las

necesidades volumétricas de la construcción naval romana. En esencia constaban de arcadas o columnatas alineadas rematadas con cimbras y techos de madera o de fábrica. En astilleros importantes los techados se sustentaban sobre arcos o su peso se descargaba mediante bóvedas. En los puertos de cierta importancia habría diques secos, al igual que el existente en el puerto de Motya, según Blackman¹⁴.

Los almacenes se construían en la ciudad y en el puerto, y servían de depósito para las mercancías que esperaban su redistribución por la zona de influencia comercial, o su estiba en los barcos. Los almacenes dedicados a los productos básicos de alimentación y los militares, tenían una importancia especial, normalmente estratégica, y su control lo monopolizaba el estado¹⁵.

Las estradas, o varaderos, rampas de pequeña pendiente por las que se elevaba el barco a tierra desde el mar, o se botaba hacia el agua desde tierra. Se construían colocando dos vigas de madera, paralelas entre sí y dispuestas transversalmente a la línea de costa sobre travesaños apoyados en la arena de la playa, o revistiendo la pendiente con losas de piedra o de mortero hidráulico. La disposición de los varaderos al fondo de la dársena, junto al arranque del dique del puerto, se repite en otros hallazgos portuarios como en Murgi¹⁶, Bares o en el Pireo¹⁷. La pendiente de la rampa variaba, pudiendo alcanzar valores de 1/14¹⁸.

Sistemas de aguada: El servicio de aguada era esencial en los puertos, y lo debió ser desde el comienzo del puerto como estructura comercial y militar. En ciertos puertos como el antiguo de Ostia, el agua potable se traía a base de un sistema hidráulico sofisticado, consistente en acueductos¹⁹. Solía haber un depósito de regulación de agua, como el hallado en Leptis Magna²⁰. En España, el sistema de aguada está perfectamente documentado por los trabajos de Maciñeira²¹ del puerto de Bares, que como era general en todos los puertos, consistía en: Un punto de captación de agua; Una conducción para el transporte de agua: una tubería formada por piezas de barro cocido; Un punto de salida de agua, regulado por un depósito. La importancia que se le daba a este servicio portuario se aprecia en que viene reproducido el mencionado mosaico de Toledo, junto al dique vertical, como una conducción de sección rectangular tapada.

Maquinaria: Para el izado de los barcos a tierra se disponía de la maquinaria auxiliar del varadero, cuya existencia y utilización se menciona en los clásicos: Homero (Iliada II-153), Heródoto (II-154) y (II-159), Tucídides (III-15). Pero, también se emplearon grúas en estas operaciones así como en las de estiva y desestiva, Vitruvio (X-5). Para conocer parte de la maquinaria utilizada por la ingeniería civil romana se debe leer el libro décimo del tratado de Vitruvio, en el que tras describir una serie de grúas entre las que se encuentran las que se muestran en las figuras 8 y 9, las más comunes en los puertos, indica: "...

14 Blackmann, D.J. Ancient Harbours in the Mediterranean., ob cit.

15 Morin, Étienne. El puerto de Roma en el siglo II de nuestra era. Ostia, Bilbao, Ediciones Mensajero, 1995.

16 Peña Olivas, José Manuel de la y Juan M. Prada Espada. Murgi: un antiguo puerto romano en Almería. Revista de Arqueología, 1995, nº 168, pp. 36-43.

17 Blackmann, D.J. Ancient Harbours in the Mediterranean., ob cit.

18 Ibidem.

19 Ibidem.

20 *Ibidem* y Morin, Étienne. El puerto de Roma en el siglo II de nuestra... ob. cit.

21 Maciñeira y Pardo de Lama, Federico. Bares. Puerto Hispánico de Enlace de la Primitiva Navegación Occidental, Santiago de Compostela, Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Instituto P. Sarmiento de Estudios Gallegos, 1947(revisado y publicado por Fermín Bouza-Brey).

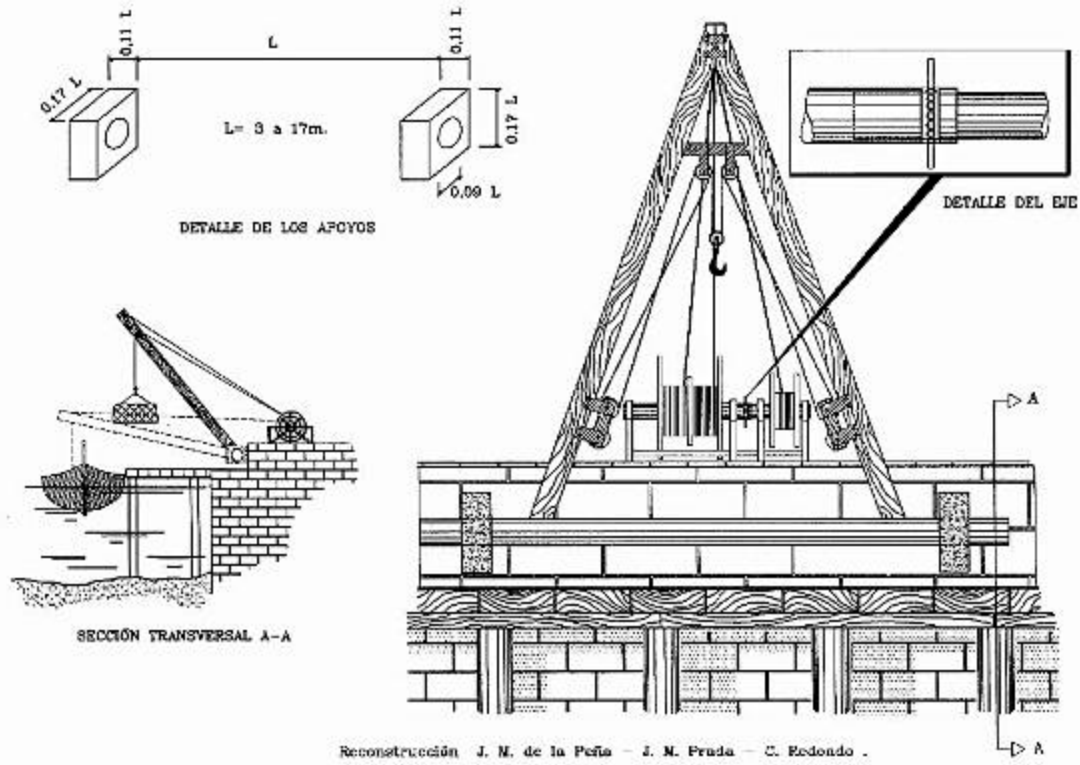


Figura 8: Grúa romana de eje horizontal (de la Peña, Prada & Redondo).

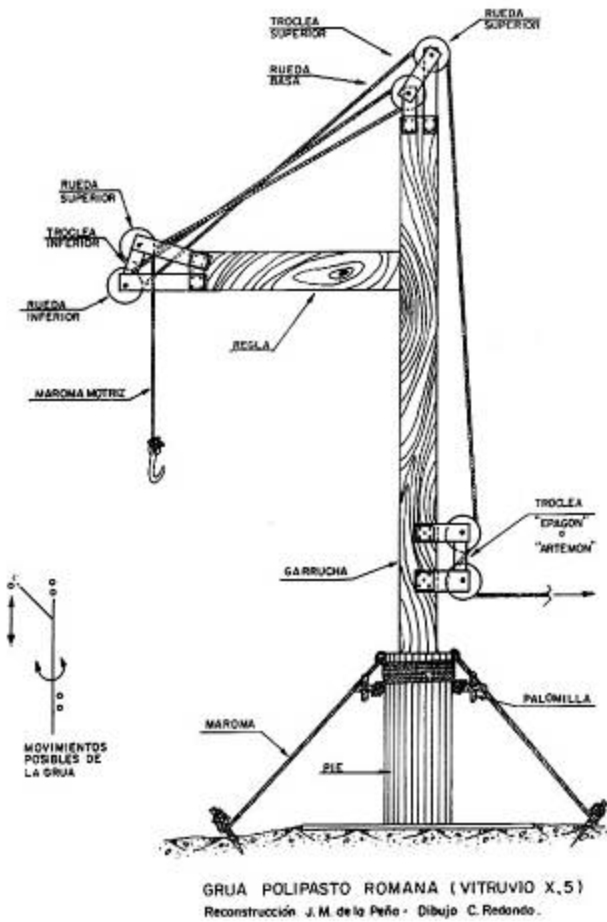


Figura 9: Grúa romana de eje vertical (de la Peña, Prada & Redondo).

Todos estos tipos de máquinas que se han descrito hasta ahora sirven no solo para lo que hemos dicho, sino también para cargar y descargar naves, colocándolas unas derechas y otras echadas sobre soportes de rotación. Igualmente sin aparejos de maderos, sino disponiéndolas en tierra, siguiendo las mismas reglas y sirviéndose únicamente de cordajes y un sistema de poleas se pueden sacar las naves del agua...” Si se examina con detenimiento la frase en la que se dice que se disponían las grúas “...colocándolas unas derechas y otras echadas sobre soportes de rotación...” y se busca entre los registros arqueológicos datos que apoyen esta afirmación, se encuentra que en los muros perimetrales de los muelles existieron bloques de hormigón o de piedra en los que se había tallado un hueco circular, separados entre si una cierta distancia, idénticos a los que aparece en los muelles de la rivera del Tiber, en Marmorata, que alojarían los ejes de rotación de grúas de eje horizontal como la dibujada en la figura 8. O huecos verticales al pie de los muelles como los identificados por Inman en el puerto fluvial romano de Aquilea. Destinado a albergar el eje de una grúa vertical, del tipo que aparece en la figura 9.

Se podría calcular el tamaño y la robustez de las grúas de eje horizontal indagando entre los restos arqueológicos de puertos de la época o analizando sus descripciones, Blackman²²: “...Alrededor del puerto de Trajano se han conservado bloques de piedra dispuestos regularmente en el muro del muelle cada 14-15 m; habría probablemente más de cien. En la misma Roma había muchos a lo largo de los muelles fluviales; alguno de los cuales con una cabeza de león esculpida en el frente del bloque...”. Con estos datos, las grúas del puerto de Trajano alcanzarían alturas máximas del orden de los 25 m.

22 Blackmann, D.J. Ancient Harbours in the Mediterranean., ob cit.